International Journal of Mechanics Research 力学研究, 2020, 9(4), 191-200
Published Online December 2020 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/ijm
https://doi.org/10.12677/ijm.2020.94021

Hans汉斯

超深井套管外挤载荷的不确定性分析方法

李　猛，苏堪华*，刘　琦*，万立夫

重庆科技学院石油与天然气工程学院，重庆
Email: *sukanhua1978@163.com, *limengti06@126.com

收稿日期：2020年10月18日；录用日期：2020年12月24日；发布日期：2020年12月31日

摘　要

针对超深井复杂地层参数信息具有随机性的特点，提出了一定置信水平下超深井复杂地层外挤载荷的不确定性分析方法。在考虑地层－水泥环－套管系统完整性的超深井套管外挤载荷模型的基础上，引入概率统计理论，对外挤载荷不确定性进行参数敏感性分析，统计各参数的分布形式，推导出外挤载荷的不确定性分布状态及分布函数，并以库车地区多口井为例，进行了超深井套管外挤载荷的不确定性分析。结果表明：地层弹性模量、地层泊松比的随机性为超深井外挤载荷不确定性的主要影响因素；不确定性分析方法得到的超深井套管外挤载荷当量密度剖面不是单一曲线，而是具有一定置信水平的区间；与不确定性分析方法计算结果相比，传统单值计算方法得到的套管外挤载荷或偏大或偏小，根据套管层次不同而有所差异；套管外挤载荷的不确定性分析方法可以有效地避免传统套管设计方法造成的过安全或欠安全，可为套管抗挤安全系数的选取提供依据。

关键词

超深井，地层参数，不确定性，外挤载荷，置信区间

Uncertainty Analysis Method of Casing Extrusion Load of Ultra-Deep Wells

Meng Li, Kanhua Su*, Qi Liu*, Lifu Wan

School of Petroleum, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing
Email: *sukanhua1978@163.com, *limengti06@126.com

Received: Oct. 18th, 2020; accepted: Dec. 24th, 2020; published: Dec. 31st, 2020

Abstract

With the consideration of the randomness of complex geologic parametersfor ultra-deep wells, an

*通讯作者。

文章引用: 李猛, 苏堪华, 刘琦, 万立夫. 超深井套管外挤载荷的不确定性分析方法[J]. 力学研究, 2020, 9(4): 191-200.
DOI: 10.12677/ijm.2020.94021

uncertainty analysis method is presented for the extrusion load on casing in ultra-deep wells through complex formation at a certain confidence level. Based on the extrusion load model for casing in ultra-deep wells and the prerequisite of integrity of formation-cement ring-casing, the probability and statistics theory is introduced and the sensitivity analysis on the uncertainty of extrusion load of casing is conducted. The distribution types of each formation parameters are determined statistically. The distribution type and distribution function of the extrusion load of casing are derived. Then, the uncertainty analysis of the extrusion load of casing is carried out on several ultra-deep wells in Kuqa block as case study. Several conclusions are made regarding to the field trial result. The randomness of formation elasticity modulus and formation Poisson's ratio is the main influence factor. Compared with the result of uncertainty analysis, an error exists in the result of traditional single valued calculation method. The error varies with different casing program and can be positive or negative. The application of uncertainty analysis of extrusion load of casing provides proof for the accurate determination of casing collapse safety factor. Thus, the over engineering design and under engineering design as a result of tradition casing design will be avoided.

Keywords

Ultra Deep Well, Formation Parameters, Uncertainty, Squeezing Load, Confidence Interval

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 前言

对于深井、超深井而言，地质构造复杂、岩性变化大，不同地区地层参数的数值变化较大，即使是同一地层不同深度处地层参数也大小迥异[1]。由于超深井套管外挤载荷的不确定性，使得钻井过程中极易发生套管挤毁事故，据不完全统计[2] [3] [4]，已有大北 6 井、克深 2 井、吐北 4 井、克深 5 井、大北 203 井、乌泊 1 井、东秋 5 井、车古 2 井、却勒 1 井、新 101 井等发生了套管挤毁事故。实际上，套管外挤载荷的不确定性使得其预测结果应为一个区间，而不是一单值，且套管外挤载荷的实际值包含在此区间内。

当前套管外挤载荷预测方法均为确定性的单值计算方法[5] [6] [7] [8] [9]：一类是假设有效外挤力均匀分布在套管圆周上，进行套管均匀外挤载荷计算，例如，Pattilo，P.D.等将径向非均匀挤压载荷等效为均匀外挤力学分析模型(2003)；廖华林等在等效外挤载荷模型基础上，建立了内壁磨损条件下的套管均布载荷外挤计算模型(2010)。二是在套管均匀外挤载荷模型的基础上，考虑原场地应力、地层蠕变等条件，进行套管非均布载荷计算，例如，EI-Sayed A. H.，Khalaf F.等得出受非均匀外挤力的套管非正常损坏的计算模型，并针对不同的套管类型，得出相应的套损预测精度(1989)。三是考虑部分地层参数的影响，施太和等在泥岩蠕变非均匀外载模型的基础上，建立了套管外载的三维有限元模型(2008)；万立夫等对不同地应力条件下的不同类型套管的外挤载荷进行了有限元模拟(2012)。而超深井地质条件复杂，目前专门针对深井、超深井套管外载预测方法仍不完善。

为解决深井、超深井套管外挤载荷参数随机性引起的外挤载荷不确定性问题，本文从拉梅问题出发，考虑地层—水泥环—套管系统完整性[2] [5]，以及超深井各个地层组地层参数的随机性，引入概率统计方法，推导出深井、超深井套管外挤载荷的概率密度函数和累积概率函数，提出一定置信水平下的超深井

套管外挤载荷不确定性分析方法。该方法对深井、超深井套管的选择及井身结构的设计具有一定的指导意义。

2. 超深井套管外挤载荷模型

由于深井、超深井地质条件复杂，而传统的套管外挤载荷计算模型没有深入考虑地层参数对外挤载荷的影响[10] [11] [12] [13] [14]，因此，本文在等效地应力地层—套管系统模型的基础上，考虑地层—水泥环—套管系统的完整性，建立了超深井套管的外挤载荷模型[15] [16]：

$$p = 2\frac{E_c\left(1-m^2\right)\left(1+\upsilon_s\right)\left(1-\upsilon_s\right)\sigma + E_s\left(1+\upsilon_c\right)\left(1-\upsilon_c\right)m^2 q}{E_c\left(1-m^2\right)\left(1+\upsilon_s\right) + E_s\left(1+\upsilon_c\right)\left(1-2\upsilon_c+m^2\right)} \tag{1}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_H \cdot \sigma_h} \tag{2}$$

$$\begin{cases} \sigma_H = \left(\dfrac{\upsilon_s}{1-\upsilon_s} + \beta\right)\left(\sigma_v - \alpha P_p\right) + \alpha P_p \\ \sigma_h = \left(\dfrac{\upsilon_s}{1-\upsilon_s} + \gamma\right)\left(\sigma_v - \alpha P_p\right) + \alpha P_p \end{cases} \tag{3}$$

$$q = -0.00981\left(1-k_m\right)\rho h \tag{4}$$

令

$$\begin{cases} k_1 = E_c\left(1-m^2\right)\left(1+\upsilon_s\right)\left(1-\upsilon_s\right)\sigma \\ k_2 = \left(1+\upsilon_c\right)\left(1-\upsilon_c\right)m^2 q \\ k_3 = E_c\left(1-m^2\right)\left(1+\upsilon_s\right) \\ k_4 = \left(1+\upsilon_c\right)\left(1-2\upsilon_c+m^2\right) \end{cases} \tag{5}$$

则 k_1、k_3 为 υ_s 的函数，k_2、k_4 为常数。公式(3)可变为：

$$p = 2\frac{k_1 + E_s k_2}{k_3 + E_s k_4} \tag{6}$$

式中，σ_v 为垂向地应力，MPa，$\sigma_v = \dfrac{G_0 gh}{10^3}$，$G_0 = A + Bh - Ce^{-Dh}$，$h$ 为深度，m；A、B、C、D 为拟合系数，无因次；p 为外载荷，MPa；σ为水平地应力，MPa；E_c、υ_c 分别为套管弹性模量，GPa、套管泊松比，无因次。m 为套管内外径比，无因次；E_s、υ_s 分别为地层弹性模量，GPa、地层泊松比，无因次；q 为内压力，MPa；ρ 为钻井液密度，g/cm^3；k_m 为掏空系数。

3. 超深井套管外挤载荷的不确定性分析

3.1. 超深井套管外挤载荷参数的随机性分析

(1) 外挤载荷参数变差系数对比

变差系数是衡量参数随机性程度大小的指标，可定义为：

$$COV = \frac{\sigma}{\mu} \tag{7}$$

式中，COV 为变差系数，无因次；σ 为标准差；μ 为均值。

以西部油田山前地区超深井资料为例，统计可得影响外挤载荷不确定性主要参数的变差系数大小(见图 1)。统计结果显示，各地层组中地层岩石弹性模量与地层岩石泊松比的变差系数变差系数更大，即地这两个参数是影响外挤载荷不确定性的主要影响因素。

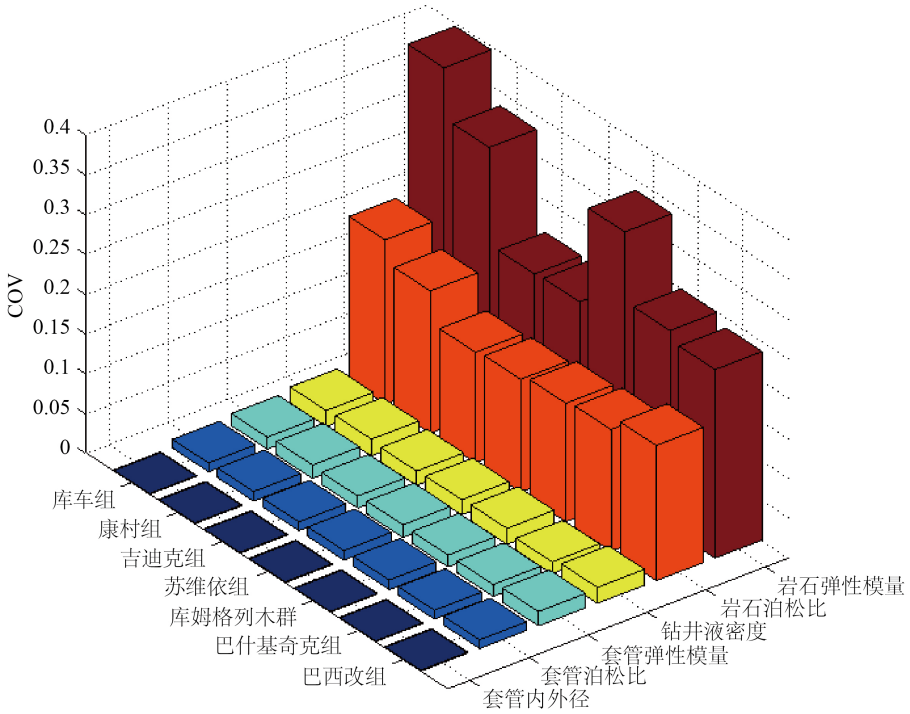
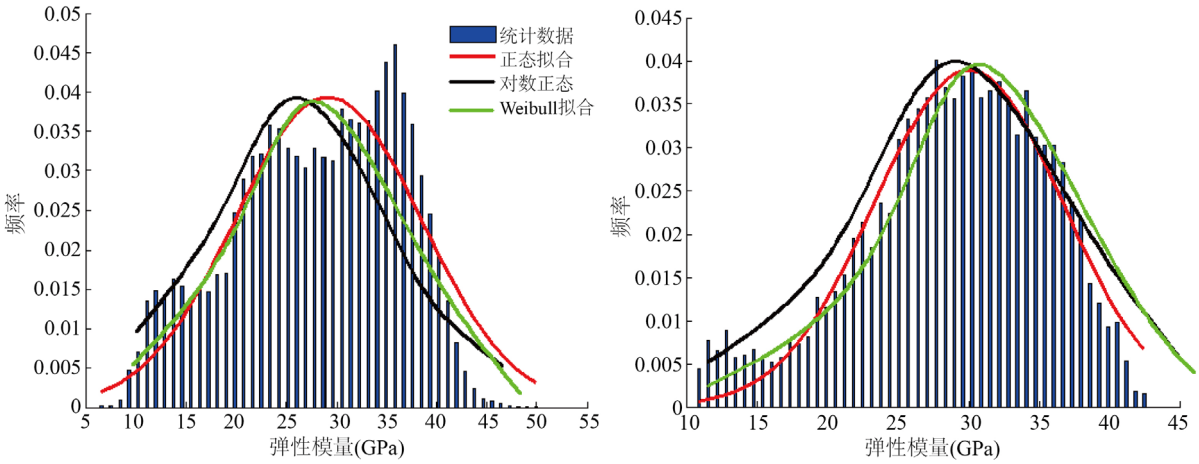


Figure 1. Comparison of variation coefficients of main parameters of extrusion load in ultra deep wells

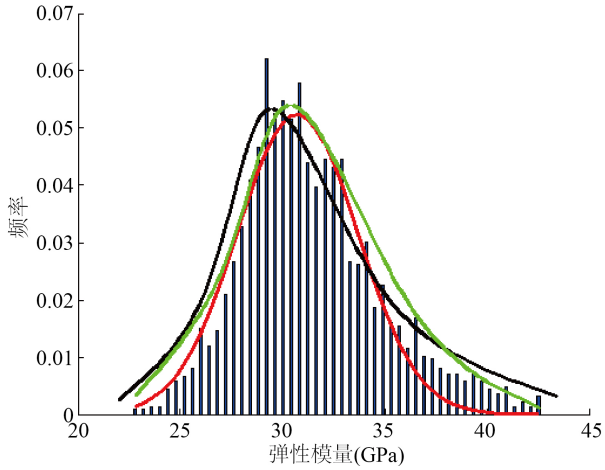
图 1. 超深井套管外挤载荷主要参数的变差系数对比

(2) 影响外挤载荷不确定性的主要参数分布形式确定

将上述各地层组地层弹性模量(如图 2 所示)、地层泊松比进行统计。对统计结果与拟合曲线进行相关性检验[17] [18]，得到地层弹性模量、地层泊松比分别与三种分布形式的平均相关系数(见表 1)。



(a) 库车组　　(b) 康村组



(c) 吉迪克组

Figure 2. Elastic modulus statistics and fitting distribution results in each layer
图 2. 各地层组弹性模量统计及拟合分布结果

Table 1. Average correlation coefficient
表 1. 平均相关系数

参数	正态分布	对数正太分布	Weibull 分布
地层弹性模量	0.962	0.836	0.851
地层泊松比	0.921	0.842	0.857

上述地区各地层组弹性模量、泊松比的分布规律均与正态分布拟合较好(见图 3 和图 4)，其与正态分布的平均相关性系数分别为 0.962、0.921，均为显著强相关(见表 1)，故地层弹性模量、地层泊松比的统计结果可以用正态分布函数拟合。

3.2. 超深井套管外挤载荷分布形式的确定

可将地层弹性模量与地层泊松比看作是二维随机变量。假设用 Z 表示外挤载荷 p，其对应的随机数值为 z；用 X 表示地层弹性模量 E_s，其对应的随机数值为 x；用 Y 表示地层泊松比 υ_s，其对应的随机数值为 y，则式(6)可表示为：

$$z = g(x, y) = \frac{2(k_1 + xk_2)}{k_3 + xk_4} \tag{8}$$

由式(7)可知，k_1、k_3 为 y 的函数。则：

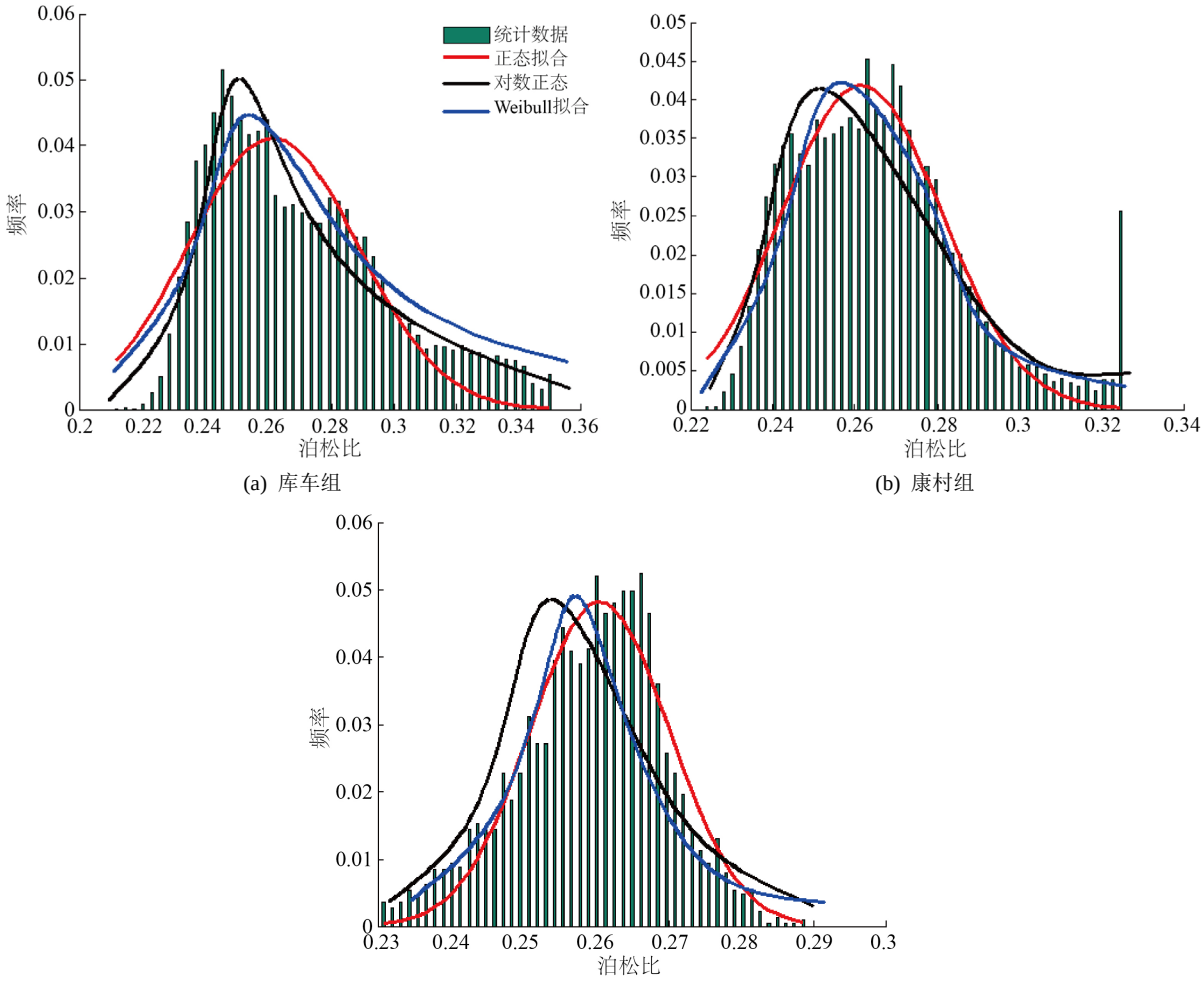
$$x = g^{-1}(z, y) = s(z, y) = \frac{2k_1 - zk_3}{zk_4 - 2k_2} \tag{9}$$

对 $s(z, y)$ 中 z 求偏导得：

$$\frac{\partial s}{\partial z} = \frac{-k_3(zk_4 - 2k_2) - k_4(2k_1 - zk_3)}{(zk_4 - 2k_2)^2} = \frac{2(k_2k_3 - k_1k_4)}{(zk_4 - 2k_2)^2} \tag{10}$$

设(X, Y)的概率密度函数为 $f_{X,Y}(x, y)$，故[17]：

$$f_{X,Y}(x, y) = f_X(x) \cdot f_Y(y) \tag{11}$$

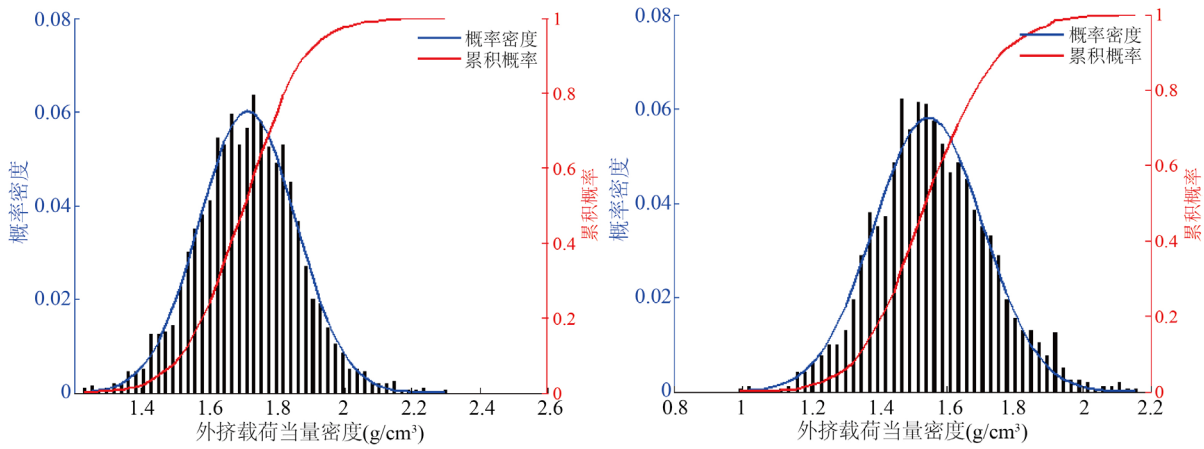


(a) 库车组

(b) 康村组

(c) 吉迪克组

Figure 3. Statistics and fitting distribution results of Poisson's ratio in each layer
图 3. 各地层组泊松比统计及拟合分布结果



(a) 3290 m 处

(b) 5290 m 处

Figure 4. Equivalent density distribution of external collapse load
图 4. 超深井套管外挤载荷当量密度分布

式中，$f_X(x)$、$f_Y(y)$ 分别为 X、Y 的概率密度函数。

根据概率理论[18]，z 的概率密度函数可表示为：

$$f_Z(z)=\int_{-\infty}^{+\infty} f_{X,Y}\left(g^{-1},y\right)\frac{\partial g^{-1}}{\partial z}\mathrm{d}y=\int_{-\infty}^{+\infty} f_X\left[s(z,y)\right]f_Y(y)\frac{\partial s}{\partial z}\mathrm{d}y \tag{12}$$

由于地层弹性模量和泊松比均服从正态分布。因此，可将式(8)和式(9)~式(11)代入式(12)，得到外挤载荷的概率密度函数为：

$$f_Z(z)=\frac{1}{\pi\sigma_x\sigma_y}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{(k_2k_3-k_1k_4)}{(zk_4-2k_2)^2}\exp\left[-\frac{\left(\frac{2k_1-zk_3}{zk_4-2k_2}-\mu_x\right)^2}{2\sigma_x^2}-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right]\mathrm{d}y \tag{13}$$

对式(13)积分可得超深井套管外挤载荷的累积概率函数为：

$$F_Z(z)=\frac{1}{\pi\sigma_x\sigma_y}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{\frac{2(k_1+xk_2)}{k_3+xk_4}}\frac{(k_2k_3-k_1k_4)}{(zk_4-2k_2)^2}\exp\left[-\frac{\left(\frac{2k_1-zk_3}{zk_4-2k_2}-\mu_x\right)^2}{2\sigma_x^2}-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right]\mathrm{d}y\mathrm{d}z \tag{14}$$

由式(13)可知超深井套管外挤载荷的不确定性分布服从正态分布；若设定累积概率，根据式(14)可求解不同井深处一定累计概率下的超深井套管外挤载荷。以山前区块 GN-3 井为例，外挤载荷当量密度的概率密度、累积概率曲线如图 4 所示。

4. 实例分析

以西部油田山前地区为例，对该地区超深井套管外挤载荷的不确定性进行分析。首先，建立上覆岩层压力当量密度剖面，然后对该地区各地层组岩石的弹性模量、泊松比进行概率统计，得出其分布状态及分布参数表征值(见表 2)，而后按照套管外挤载荷的累积概率函数(式 14)沿井深方向计算累积概率分别为 5%和 95%、35%和 65%的外挤载荷当量密度，得到置信水平分别为 90%、30%的套管外挤载荷当量密度分布区间，并与传统套管外挤载荷计算方法进行对比分析。

Table 2. Random Statistical results of main formation parameters in different formations
表 2. 各地层组主要地层参数随机性统计结果

地层组	弹性模量			泊松比		
	均值(GPa)	标准差(GPa)	变差系数	均值	标准差	变差系数
库车组	28.028	8.253	0.294	0.270	0.028	0.106
康村组	28.860	6.673	0.231	0.266	0.021	0.079
吉迪克组	31.444	3.432	0.109	0.259	0.010	0.039
苏维依组	30.855	3.452	0.111	0.261	0.011	0.042
库姆格列木群	28.889	3.952	0.136	0.267	0.013	0.049
巴什基奇克组	28.169	4.200	0.149	0.269	0.014	0.053
巴西改组	26.464	3.627	0.137	0.255	0.018	0.070

根据该地区地层参数进行概率统计结果(见表 2)，按照文献[17]得出了 GN-3 井的置信水平分别为 90%、30%的套管外挤载荷区间，如图 5 所示。与传统的单一套管载荷曲线相比，具有一定置信水平的套管外挤载荷区间更多地考虑了超深井各地层组主要岩石参数可能出现的变化，求得的每一井深处的套管外挤载荷也会呈现一定的变化。对于工程设计人员来说，把握超深井每一井深处套管外挤载荷可能出现的范围，比仅得知套管外挤载荷的单一数值更加实际有效。若传统的套管外挤载荷计算方法得到的单一数值比实际超深井套管外挤载荷值偏高，设计人员将会选择更高级别的套管，从而导致设计过安全，造成套管选材成本过高；若传统计算方法得到的单一数值比实际套管外挤载荷值偏低，设计人员将会选择更低级别的套管，从而导致设计欠安全，易引发套管安全事故。因此，给出超深井套管外挤载荷的范围将利于设计人员做出更加安全有效的设计方案，从而降低套管选材成本或者减少套管安全事故的发生。

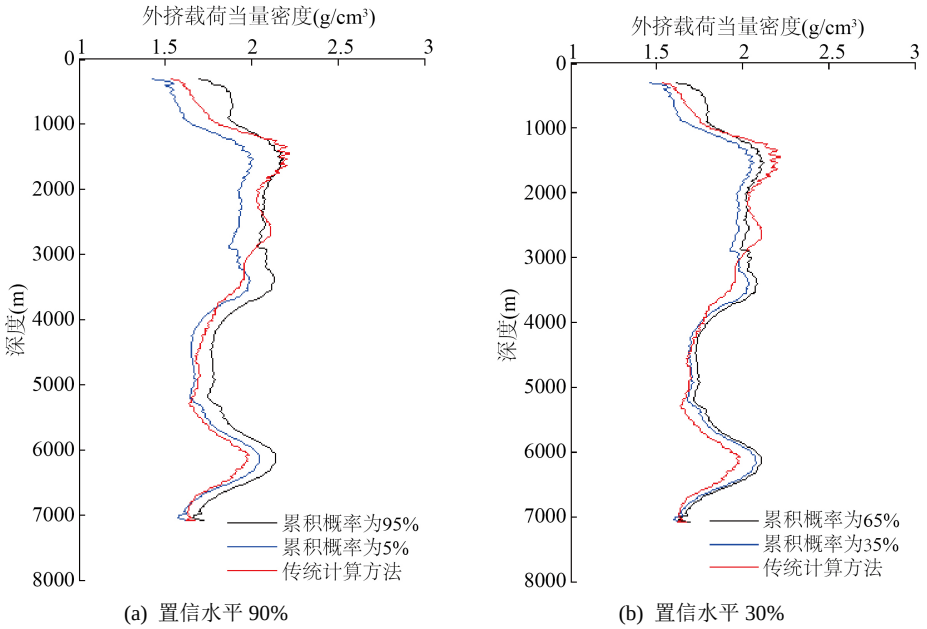


Figure 5. Equivalent density profile of casing extrusion load under different confidence levels
图 5. 不同置信水平条件下套管外挤载荷当量密度剖面

从图 5(a)中可以看出，在井深 1200 m~2800 m 处，传统单值计算方法得到的外挤载荷当量密度略高于或接近于累积概率为 95%的外挤载荷当量密度；从图 5(b)可以看出，在井深 1200 m~2800 m 处，传统单值计算方法得到的外挤载荷当量密度比累积概率为 65%的外挤载荷当量密度平均高出 0.17 g/cm^3 左右，导致套管设计过安全，选材级别过高，造成一定的浪费；在井深 5200 m~7000 m 段，传统单值计算方法得到的外挤载荷当量密度比累积概率为 5%、35%的外挤载荷当量密度分别平均低 0.12 g/cm^3、0.18 g/cm^3，导致套管设计欠安全，选材级别过低，套管易发生挤毁事故(见表 3)。

综上所述，由传统外挤载荷计算方法所选择的山前地区表层套管过安全，而技术套管、油层套管欠安全。而按照超深井套管外挤载荷的不确定性分析方法可选择更低级别的表层套管，以降低成本；对于技术套管及油层套管需选择更高级别套管，以提高抗挤安全性。与传统单一曲线相比，不确定分析方法更多的考虑了每一深度处可能出现的外挤载荷大小，对于超深井复杂地层钻井来说，在获取可能出现的外挤载荷的区间之后，可以根据其结果区间更加合理的选择套管抗挤安全系数，既避免套管材料浪费，又可以提高套管的安全设计，这比利用单一外挤载荷曲线选择套管更接近实际情况，有利于指导井身结构设计。

Table 3. Casing program and safety situation in GN-3 well
表 3. 超深井套管程序及安全情况

井号	套管层次	套管尺寸(mm)	套管下深(m)	钢级	壁厚(mm)	备注
GN-3	表层套管	508.0	0~308	J55	12.7	安全
	技术套管 1	339.7	0~3891	TP110V	12.19	变形
	技术套管 2	244.5	3773~4750	BG110TT	11.99	变形
		250.8	4750~5184	TP140V	15.88	安全
		244.5	5184~6219.5	BG110TT	11.99	失效
		250.8	6219.5~6555	TP140V	12.19	失效
		244.5①	0~3250	TP140V	11.99	安全
		244.5①	3250~3773	BG110TT	11.99	安全
	油层套管 1	177.8	6617~6845	TP140V	14.8	安全
		177.8②	0~6616	TP140V	12.65	安全
	油层套管 2	127.0	6332~6918	BG140	9.5	安全

注：技术套管 1、2 分别为第一、二层技术套管，油层套管 1、2 分别为第一、二层油层套管；①、②为回接套管。

5. 结论

(1) 考虑到超深井复杂地层外挤载荷的不确定性，其数值大小不应是单一曲线，而是一外挤载荷分布区间，这更有利于工程设计人员明确复杂地层的外挤载荷信息。

(2) 因此，在计算过程中，应尽量多的获取精确资料，有效剔除数据误差，减小外挤载荷的不确定性分布范围，以利于钻井工程设计，选择更为合适的套管，在确保安全的同时，降低成本。

(3) 通过对山前地区多口井分析计算表明，与传统的单值计算方法相比，不确定性外挤载荷计算方法可确定更加合理的套管抗挤安全系数，能够更好地指导井身结构设计，为超深井套管的选择提供更加有力的依据。

基金项目

国家自然科学基金项目(51804061, 51974052, 51774063)；重庆市科技局项目([cstc2019jcyj-msxmX0199], [cstc2018jcyjAX0417])；重庆市教委项目(KJQN201901544)。

参考文献

[1] 龙刚, 李猛, 管志川. 深井套管安全可靠性评价方法[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(4): 48-53.

[2] 李猛. 超深井套管柱的载荷不确定性分布及安全可靠性分析[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2008.

[3] 廖华林, 管志川, 冯光通. 深井超深井套管损坏机理与强度设计考虑因素[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(2): 1-4.

[4] 万立夫, 李根生, 管志川. 深井套管强度设计中实际外挤载荷的数值分析[J]. 石油机械, 2012, 40(4): 1-4.

[5] 李志明, 殷有泉. 油水井套管外挤力计算及其力学基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.

[6] Pattilo, P.D., Last, N.C. and Asbill, W.T. (2003) Effect of Nonuniform Loading on Conventional Casing Collapse Resistance. *SPE/IADC Drilling Conference*, Amsterdam, 19-21 February 2003, SPE 79871. https://doi.org/10.2118/79871-MS

[7] El-Sayed, A.H. and Khalaf, F. (1992) Resistance of Cemented Concentric Casing Strings under Non-Uniform Loading. *SPE Drilling Engineering*, **7**, 59-64. https://doi.org/10.2118/17927-PA

[8] 国家发展和改革委员会. SY/T 5724-2008 套管柱结构与强度设计[S]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2008.

[9] 樊洪海, 叶志, 纪荣艺. 三维上覆岩层压力计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 3879-3883.

[10] Steve, H. (1999) Pre-Drill Overburden Estimation.

[11] 王耀锋, 李军强, 杨小辉. 套管-水泥环-地层系统应力分布规律研究[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(5): 8-12.

[12] Klever, F.J. and Tamano, T. (2004) A New OCTG Strength Equation for Collapse Under-Combined Loads. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, 26-29 September 2004, SPE 90904. https://doi.org/10.2118/90904-MS

[13] 杨恒林, 陈勉, 金衍. 蠕变地层套管等效破坏载荷分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(4): 95-98.

[14] Aasen, J.A., Bernt, S. and Aadnoy (2007) Three-Dimensional Well Tubular Design Improves Margins in Critical Wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **56**, 232-240. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2006.09.005

[15] Adams, A.J., Parfitts, H.L., Reeves, T.B., *et al*. (1993) Casing System Risk Analysis Using Structural Reliability. *SPE/IADC Drilling Conference*, Amsterdam, 22-25 February 1993, SPE/IADC 25693. https://doi.org/10.2118/25693-MS

[16] Chantose, P., Gardoni, P. and Schubert, J. (2001) Structural Reliability: Assessing the Condition and Reliability of Casing in Compacting Reservoirs. IPTC 14297.

[17] 孙志礼, 陈良玉. 实用机械可靠性设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[18] 肖筱南. 新编概率论与数理统计[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.